

DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2023.01.012.

李谢辉, 刘子堂. 四川盆地极端气温事件时空变化特征及未来趋势[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 264-273.

LI Xiehui, LIU Zitang. Spatiotemporal Change Characteristics and Future Trends of Extreme Temperature Events in Sichuan Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 264-273.

四川盆地极端气温事件时空变化特征及未来趋势

李谢辉¹, 刘子堂^{1,2}

(1.成都信息工程大学 大气科学学院, 高原大气与环境四川省重点实验室,
成都 610225; 2.石河子市人工影响天气办公室, 新疆 石河子 832000)

摘要: 极端气温事件是全球变暖的主要表现之一, 其发生不仅制约着国民经济的发展, 而且会对人民生命财产安全造成严重威胁。为了了解四川盆地极端气温事件的过去时空变化特征和未来变化趋势, 利用 1970—2019 年四川盆地内 14 个气象站点的逐日气温资料, 通过选用和计算 10 个极端气温指数, 并对这些指数进行线性回归分析、Mann-Kendall 趋势检验、滑动 T 检验、与地理因子的相关分析和 R/S 预测等, 主要对四川盆地近 50 年来极端气温事件的时空变化特征和未来趋势进行了分析。结果表明: (1) 近 50 年内, 四川盆地的极端气温指数都呈暖化趋势, 是全球变暖的正响应区; (2) 5 个极端冷指数表现为盆地的北部和西部高于南部和中东部地区, 其中四川的温江和都江堰地区普遍较低, 5 个极端暖指数表现为盆地的中东部高于西部和北部地区, 其中重庆市的万州和沙坪坝地区普遍较高; (3) 近 50 年里四川盆地的极端气温并无明显突变; (4) 极端气温指数与地理因子有关, 经度越大, 纬度越低, 海拔高度越低, 极端气温指数值变化越大, 体现为盆地的东南部地区极端气温事件变化最大; (5) 由 R/S 分析可知在未来四川盆地内的冷事件减少, 暖事件增加, 极端气温事件将继续呈现增加趋势。综上, 持续的极端暖事件的增加将会引起四川盆地干旱和高温灾害性天气的增加, 需提前做好预警和防范。

关键词: 极端气温指数; 时空变化特征; 突变检验; Hurst 指数; 四川盆地

中图分类号: P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)01-0264-10

Spatiotemporal Change Characteristics and Future Trends of Extreme Temperature Events in Sichuan Basin

LI Xiehui¹, LIU Zitang^{1,2}

(1. Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province,
School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology,
Chengdu 610225, China; 2. Shihezi Weather Modification Office, Shehezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Extreme temperature event is one of the main manifestations of global warming. Its occurrence not only restricts the development of national economy, but also poses a serious threat to the safety of people's lives and property. In order to understand the past spatiotemporal variation characteristics and future variation trends of extreme temperature events in Sichuan Basin, based on the daily temperature data of 14 meteorological stations in Sichuan Basin from 1970 to 2019, by selecting and calculating 10 extreme temperature indices, and carrying out linear regression analysis, Mann-Kendall trend test, sliding T test, correlation analysis with geographical factors and R/S prediction, we mainly analyzed the spatiotemporal change characteristics and future trend of extreme temperature events in Sichuan Basin in recent 50 years. The results showed that: (1) in recent 50 years, the extreme temperature index of Sichuan Basin showed a warming trend, which was a positive response area to global warming. (2) the five extreme cold indices were higher in

收稿日期: 2021-09-02

修回日期: 2021-11-29

资助项目: 科技部第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0105); 四川省科技计划项目(2021YJ0025)

第一作者: 李谢辉(1977—), 女, 河南平舆人, 博士, 副教授, 主要从事气象灾害风险评估与极端气候变化研究。E-mail: lixiehui@cuit.edu.cn

通信作者: 刘子堂(1998—), 男, 甘肃武威人, 学士, 助理工程师, 主要从事极端气候变化研究。E-mail: liuzitang1211@qq.com

<http://stbcj.paperonice.org>

the northern and western parts of the basin than in the southern and central-eastern regions; the five extreme cold indices of Wenjiang and Dujiangyan areas in Sichuan Province were generally lower, and the five extreme warm indices were higher in the central and eastern parts of the basin than in the western and northern regions; the five extreme warm indices of Wanzhou and Shapingba areas in Chongqing were generally higher. (3) the extreme temperature in Sichuan Basin had not changed significantly in recent 50 years. (4) the extreme temperature index was related to geographical factors; the greater the longitude, the lower the latitude and the lower the altitude, the greater the change of extreme temperature index, which was reflected in the maximum change of extreme temperature events in the southeast of the basin. (5) the R/S analysis showed that cold events will decrease in the Sichuan Basin, warm events will increase, and extreme temperature events will continue to show an increasing trend in the future. To sum up, the continuous increase of extreme warm events will lead to an increase in droughts and high-temperature disastrous weather in the Sichuan Basin, and early warning and prevention are required.

Keywords: extreme precipitation index; spatiotemporal change characteristics; mutation test; Hurst index; Sichuan Basin

20 世纪以来,在由全球变暖导致的极端天气和气候事件频发和增强中,极端气温事件被认为是全球变暖的主要表现之一,其影响范围之大已囊括全世界。如, Alexander 等研究证实,全球变暖导致全球大部分地区冷夜日数显著减少,而暖夜日数显著增加^[1-3],且在最近几十年,全球热浪和寒流事件发生频率分别增加了 2.7 倍和 6.4 倍^[4-5]。Diffenbaugh 等研究发现,在历史变暖的过程中,可在 >80% 的全球可用观测区域内,观测到年最热月份和年最热天数在程度和频率上有明显的增加;模式结果还表明,历史气候强迫则使最干旱年份和 5 日最大降水的发生概率增加,分别在全球可用观测区域中增加了 57% 和 41%^[6]。Grotjahn 等采用 POT (Peaks over Threshold) 间接拟合 GEV (Generalized Extreme Value) 的方法对北美地区进行研究,其结果表明日最低温度的冷尾部分出现的变暖区域最宽;在美国许多地区,变暖的积极趋势显而易见,有些地区具有超过 90% 置信度的统计学意义^[7]。学者们在对欧洲地中海^[8]、亚太^[9-10]、俄罗斯^[11]、墨西哥^[12]、非洲西部^[13]、印度尼西亚等^[14]区域的相关研究中也都呈现出不同程度的类似增加趋势。对中国的研究也呈现出了相同的结果,且同时证明了冷夜指数和暖夜指数在中国绝大部分地区呈现出变化强度相仿、变化趋势相反的特征,具有较好的对称性;日夜温度变化则表现出明显的不对称性,同时日较差呈变小的趋势,直接影响了温度极值的变化,并且在一定程度上加剧了水循环的过程,改变了水资源的分配^[15-17]。

四川盆地位于我国西南部,是中国四大盆地之一,其不仅是我国重要的人口密集和农业区,也是成

渝地区双城经济圈的重要区域。四川盆地属于亚热带季风性湿润气候,气温东高西低,南高北低,年内降水量分配不均,70%~75% 的降水集中于夏季,近年来,盆地内极端气温事件频发,典型事件如四川和重庆部分地区在 2006—2007 年发生的特旱,其中重庆因旱农作物受灾面积为 132.7 万 hm^2 ,直接经济损失达 90.7 亿元,四川农作物成灾面积为 116.6 万 hm^2 ,伏旱造成直接经济损失达 125.7 亿元^[18]。之后,2012 年 10 月—2013 年 3 月上旬,四川和重庆等地的严重干旱,以及后续的秋冬春连旱,2015—2019 年的阶段性局地重特旱,特别是 2017 年夏季四川盆地的持久高温大旱,其气温高达 44℃,是当地自 1951 年有气象记录以来最严重的一次;而重庆地区也在 2017 年遭遇了 60 年不遇的大旱,是有气象记录以来最长时间的伏旱,这些都对四川盆地及西南地区造成了巨大的经济损失,对人民生命财产安全造成了严重威胁。

由于全球气候变化在不同地理区域和纬度上的变化不同,在与四川盆地大致相同纬度带的研究中, Oscar 等在对墨西哥部分地区与温度有关指数的重要变化分析表明,最高气温上升,最低气温下降^[12];高佳佳等利用拉萨市 1961—2014 年逐日最高和最低气温数据的分析表明,近 54 年来拉萨市极端高温指数变化幅度不大,而极端低温指数逐年增高,极端高温发生频次呈现增加趋势,极端低温则总体呈现减少趋势^[19]。目前,已有部分学者对西南地区和四川省的极端气温事件进行了一些研究^[20-22],但还缺乏针对在全球变暖背景下极端气温事件频发,且更小尺度区域四川盆地的细致和较全面研究。因此,本文通过选

取和计算由 WMO 推荐的 10 个极端气温指数,首先对四川盆地 1970—2019 年的 10 个极端气温指数进行时空变化特征分析,然后采用 Mann-Kendall 和滑动 T 检验进行突变特征分析,并对极端气温指数与地理因子的关系进行讨论,最后利用 Hurst 指数对四川盆地的未来极端气温事件的趋势进行预测分析。其研究结果能为中国西部川渝经济区在应对气候变暖背景下的防旱抗旱措施制定提供重要的科学参考决策和理论依据。

1 研究区概况

四川盆地(26°03′—34°19′N,97°21′—108°33′E)地处青藏高原东部,长江上游地带,主要包括了四川省中东部和重庆大部分地区,总面积约 26 万 km²。由于所处地形整体比较封闭,北部存在高大山脉秦岭,阻挡了冷空气的进入,冬季盆地内的气温高于同纬度其他地区;盆地内部常年多雾且湿气较重,阴雨天气在盆地内较多,且日照时数和太阳辐射均为全国较低值^[23]。图 1 是本文所选研究区的地理位置和海拔高度图。

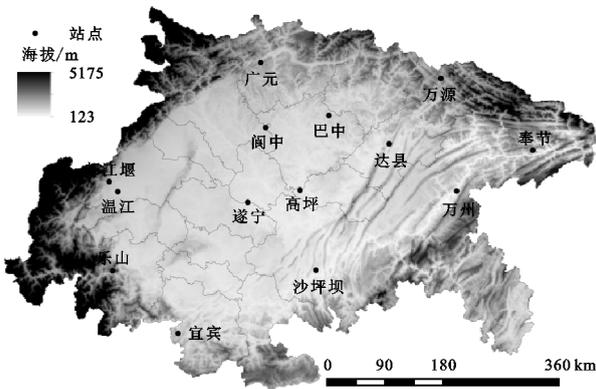


图 1 四川盆地气象站点分布和海拔高度

2 数据资料与研究方法

2.1 数据来源

本文根据中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)所提供的四川盆地内均匀分布的 14 个气象站点(图 1) 1970—2019 年的逐日气温数据进行分析,由于该数据采用了内部一致性检查、气候界限值检查、台站极值检查 3 种质量控制方法,通过对个别缺失数据进行插补处理,能保证修正后数据的科学性、准确性和连续性。统计可知,1970—2019 年间 14 个气象站的年平均气温为 17.7℃,年平均最低气温为 14.0℃,年平均最高气温为 21.4℃;50 a 中的最低气温出现在四川的万源站,为-9.4℃(1975 年 12 月 15 日),最高气温出现在

重庆的沙坪坝站,为 43℃(2006 年 8 月 15 日),最低气温的标准差为 7.2,最高气温的标准差为 8.6。

2.2 极端气温指数

由于极端气温指数的变化比使用平均值更适合监测、检测和分析气候变化的影响,因此本文采用由世界气象组织 WMO 推荐的 10 个表征极端气候变化的温度指数来进行分析,具体见表 1。

表 1 所选 10 个极端气温指数定义

指数名称/单位	缩写	定义
霜日日数/d	FD	日最低气温<0℃的日数
最小日最低气温/℃	Tnn	年内日最低气温的最小值
最大日最低气温/℃	Tnx	年内日最低气温的最大值
冷夜日数/d	Tn10	日最低气温<10%分位值的日数
冷昼日数/d	Tx10	日最高气温<10%分位值的日数
夏日日数/d	SU	日最高气温>35℃的日数
最小日最高气温/℃	Txn	年内日最高气温的最小值
最大日最高气温/℃	Txx	年内日最高气温的最大值
暖夜日数/d	Tn90	日最低气温>90%分位值的日数
暖昼日数/d	Tx90	日最高气温>90%分位值的日数

2.3 研究方法

利用线性倾向法对四川盆地近 50 年的 10 个极端气温指数时间序列进行拟合,在 ArcGIS 10 环境下,利用普通克里金插值法绘制四川盆地近 50 年的 10 个极端气温指数空间分布;为减少单一突变方法检验的不准确性,采用 Mann-Kendall 趋势检验^[24-25]和滑动 T 检验^[24]两种方法互相验证对近 50 年的 10 个极端气温指数突变特征进行分析;为具体了解极端气温指数与地理因子的关系,通过计算相关系数对 10 个极端气温指数与经纬度和海拔高度之间的相关性进行分析;由于用重标极差法(R/S 分析法)^[26]得到的 Hurst 指数可以衡量一个时间序列的统计相关性,并可对长期记忆过程进行分析,因此利用近年来在气候预测方面有较多应用的 Hurst 指数估计方法(R/S 分析法)对四川盆地极端气温指数的未来变化趋势进行预测。

3 结果与分析

3.1 时间变化趋势

图 2 为四川盆地内 10 个极端气温指数在 1970—2019 年随时间变化的线性趋势结果,其中,除了最小日最高气温 Txn 通过了 0.05 的显著性水平检验,其他 9 个指数都通过了 0.01 的显著性水平检验,趋势变化明显。

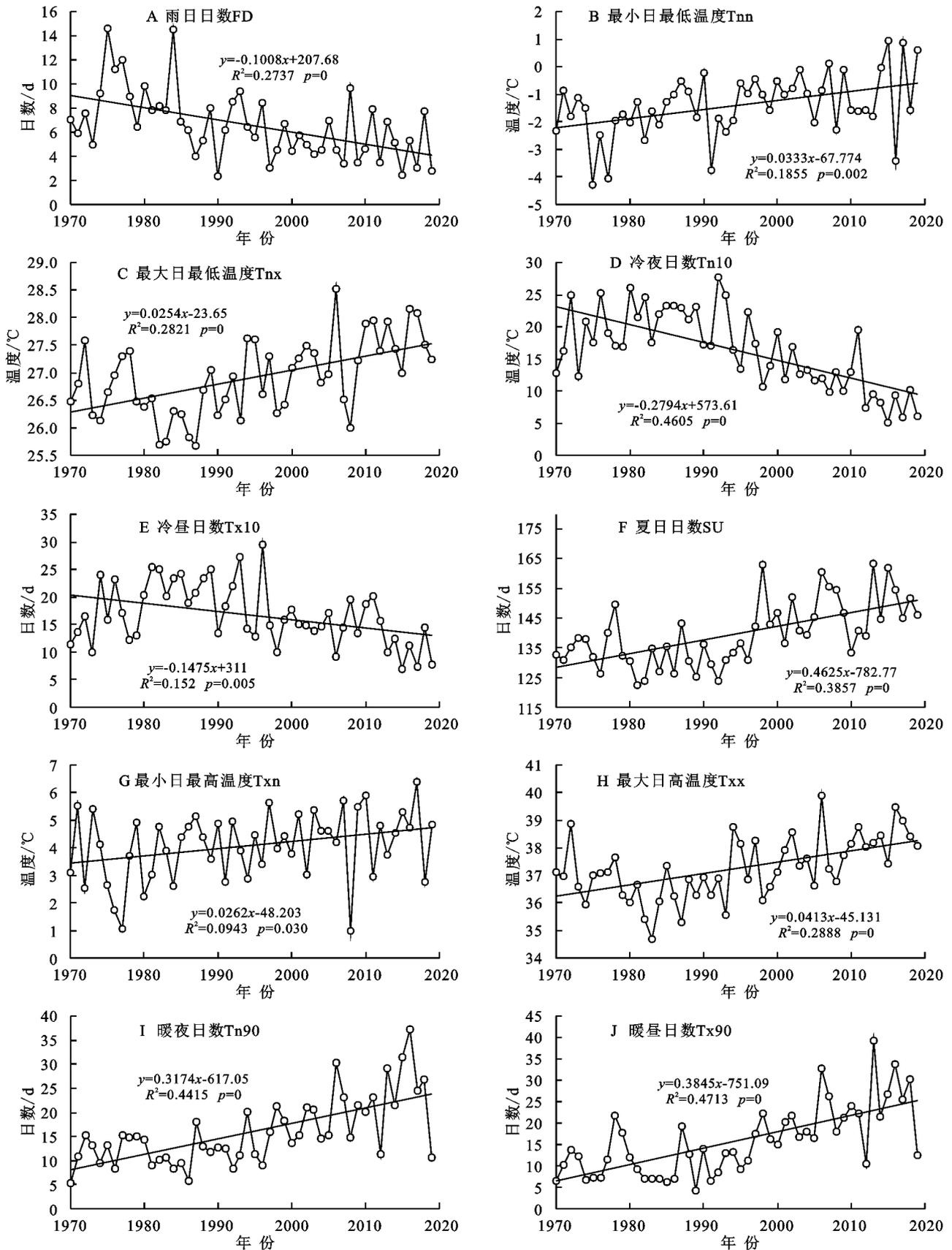


图 2 1970—2019 年四川盆地 10 个极端气温指数的年际变化趋势

可以看出,除霜日日数 FD、冷夜日数 Tn10 和冷昼日数 Tx10 分别以 1.008 d/10 a、2.794 d/10 a 和 1.475 d/10 a 的速率下降外,其他 7 个指数 Tnn, Tnx, SU, Txn,

Txx, Tn90 和 Tx90 都分别以 0.333°C/10 a、0.254°C/10 a、4.625 d/10 a、0.262°C/10 a、0.413°C/10 a、3.174 d/10 a、3.845 d/10 a 呈现上升趋势。其中,最小日最低温度

T_{nn} 、最大日最低温度 T_{nx} 、最小日最高温度 T_{xn} 、最大日最高温度 T_{xx} 的增加表明在近 50 年内四川盆地的气温极值都以增加为主。5 个极端冷指数 FD , T_{nn} , T_{nx} , T_{n10} 和 T_{x10} 均呈现温度上升或日数减少的趋势,一致具有暖化特征;5 个极端暖指数 SU , T_{xn} , T_{xx} , T_{n90} 和 T_{x90} 与 5 个极端冷指数相互印证,均呈现暖化的趋势;不同类型指数在变化幅度上表现出较强的差异,暖指数中的 SU 和 T_{x90} 日数变动幅度大于其他极端气温指数。总之,在近 50 年内,四川盆地的极端气温指数都呈现暖化趋势,是全球变暖的正响应区。

3.2 空间分布特征

图 3 为四川盆地近 50 年中 10 个极端气温指数的空间分布情况。可以看出,霜日日数 FD 主要出现在四川盆地的北部(广元和万源),50 年平均日数最多可达 28 d,南部较少,一些地区为 0 d;最小日最低温度 T_{nn} 和最大日最低气温 T_{nx} 都是盆地南部高于盆地北部和西北部,其中位于重庆市的沙坪坝地区最高,可分别为 1.37℃ 和 29.46℃;冷夜日数 T_{n10} 和冷昼日数 T_{x10} 表现为盆地的西部(温江和都江堰)最多,多于东部和其他地区,其地区的最高和最低日数分别相差为 2.33 d 和 6.26 d;夏日日数 SU 、最小日最高温度 T_{xn} 和最大日最高温度 T_{xx} 这 3 个指数的空间分布基本一致,都表现为盆地东部高于盆地西部和北部,其中万州和沙坪坝地区较高,3 个指数的最高值分别为 158.79 d, 6.32℃ 和 39.88℃,都江堰、温江、万源地区较低,3 个指数的最低值可达 110.01 d, 1.81℃ 和 33.55℃;暖夜日数 T_{n90} 和暖昼日数 T_{x90} 都表现为盆地东部高于西部,最低值位于温江和都江堰地区,其地区的最高和最低日数分别相差为 2.21 d 和 6.32 d,并与 T_{n10} 和 T_{x10} 的空间分布相对应。总体而言, FD 从南向北增加, T_{nn} 和 T_{nx} 从南向北减少,都与纬度对应; T_{n10} 和 T_{x10} 从东向西增加, SU , T_{xn} , T_{xx} , T_{n90} 和 T_{x90} 从东向西减少,都与经度和海拔高度对应;整体上,5 个极端冷指数表现为盆地的北部和西部高于南部和中东部地区,其中四川的温江和都江堰地区普遍较低,5 个极端暖指数表现为盆地的中东部高于西部和北部地区,其中重庆市的万州和沙坪坝地区普遍较高。

3.3 突变特征

图 4—5 分别为利用 M-K 突变检验和步长为 5 的滑动 T 检验对 10 个极端气温指数的检验结果。

由四川盆地近 50 年中 10 个极端气温指数的 M-K 和滑动 T 检验两种方法综合判断的结果表明,除了冷昼日数 T_{x10} 存在综合突变年外,其余 9 个指数

都未检测到综合突变年。由图 4 可以看出 T_{x10} 在 1970—2004 年呈现出上升趋势,其中在 1985—1995 年超过了显著性水平 0.05 的临界线,表现出显著上升趋势,之后呈现下降趋势,UF 下降,UB 上升,且两统计值在 2012 年存在交点,并在临界线内,表明由 M-K 方法检验出 T_{x10} 在 2012 年发生了突变;对应滑动 T 检验(图 5)的结果可知,统计值在 1970—1979 年下降,且在 1979 年、1980 年超过了 0.05 显著线,之后呈现上升趋势,特别是在 2010 年之后呈现显著上升趋势,并在 2011 年、2012 年超过了 0.05 显著线,由滑动 T 检验出存在 1979 年、1980 年、2011 年、2012 年、2014 年 5 个突变年,但综合二者检验结果印证可知, T_{x10} 只存在 2012 年一个真实突变年。对所有 10 个极端气温指数的综合分析表明,在 1970—2019 年只有 1 个指数 T_{x10} 存在突变年(2012 年),其余 9 个指数都无明显突变年,即在近 50 年里四川盆地的极端气温并无明显突变,但于 20 世纪初期有平稳上升的趋势。

3.4 极端气温指数与地理因子关系分析

表 2 列出了 10 个极端气温指数与经纬度和海拔高度之间的相关系数,所有结果都通过了 0.01 的显著性水平检验,相关性显著。

可以看出, T_{nn} , T_{n10} , T_{x10} 这 3 个极端冷指数与经度呈负相关,其余 7 个指数 FD , T_{nx} , SU , T_{xn} , T_{xx} , T_{n90} , T_{x90} 与经度呈正相关, T_{xx} 与经度的正相关系数最大,为 0.696;10 个指数中有 3 个指数 FD , T_{n90} , T_{x90} 与纬度呈正相关,其余 7 个指数 T_{nn} , T_{nx} , T_{n10} , T_{x10} , SU , T_{xn} , T_{xx} 与纬度呈负相关, T_{nn} 与纬度的负相关系数最大,为 -0.826;3 个极端冷指数 FD , T_{n10} , T_{x10} 与海拔高度呈正相关,其余 7 个指数 T_{nn} , T_{nx} , SU , T_{xn} , T_{xx} , T_{n90} , T_{x90} 与海拔高度呈负相关, T_{xn} 与海拔高度的负相关系数最大,为 -0.893。综合分析结果表明,极端气温指数的变化主要与经度呈正相关,自西向东随经度的增加而增大;主要与纬度呈负相关,随纬度从南向北递减;与海拔高度呈负相关,随海拔高度的升高而降低,即经度越大,纬度越低,海拔高度越低,极端气温指数值变化越大,体现为盆地的东南部地区极端气温事件变化最大,其结果与前述时空变化特征分析相对应。

3.5 极端气温指数的未来变化趋势

为探讨四川盆地极端气温指数的未来变化趋势,本文分别计算了 10 个极端气温指数的 Hurst 指数,结果见表 3,主要通过过去趋势变化和 Hurst 指数对未来极端气温指数的总体变化趋势进行预测。

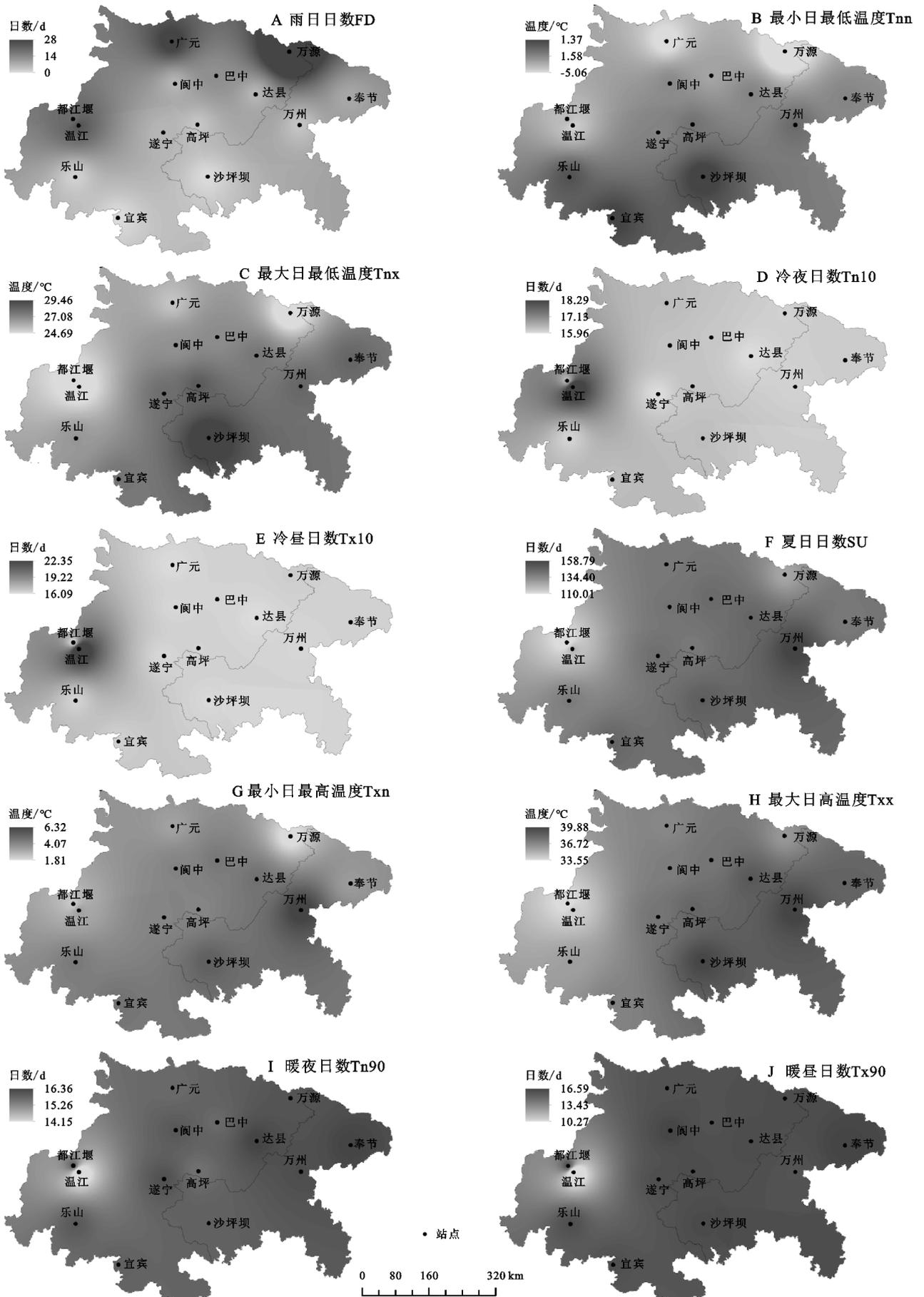


图 3 1970—2019 年四川盆地极端气温指数的空间分布

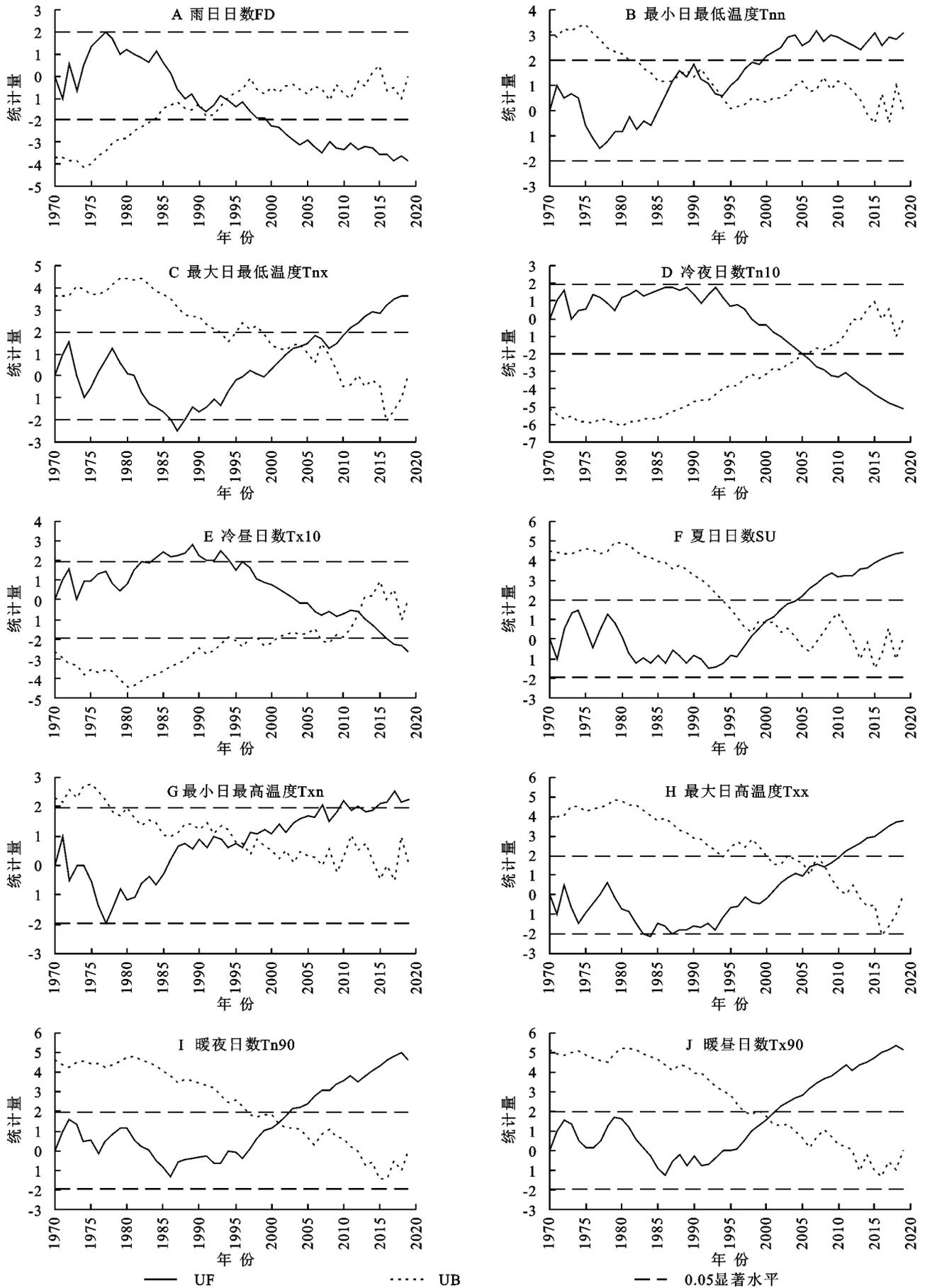


图4 四川盆地1970—2019年10个极端气温指数的M-K突变检验

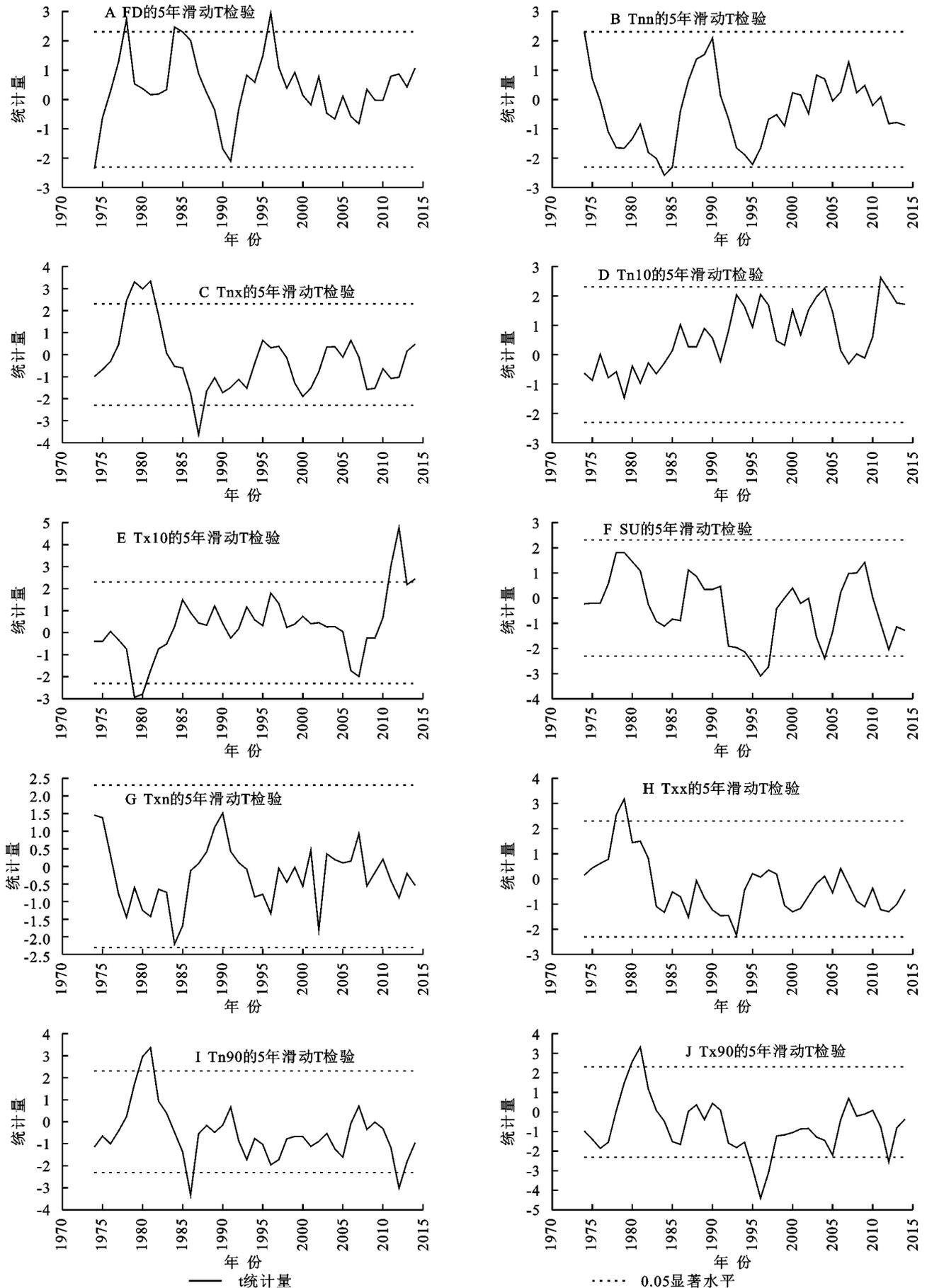


图 5 四川盆地 1970—2019 年 10 个极端气温指标的滑动 T 检验

表 2 极端气温指数与地理因子的相关性分析

极端气温指数	经度	纬度	海拔高度
FD	0.113**	0.662**	0.656**
Tnn	-0.089**	-0.826**	-0.622**
Tnx	0.341**	-0.469**	-0.745**
Tn10	-0.411**	-0.059**	0.218**
Tx10	-0.353**	-0.058**	0.198**
SU	0.477**	-0.178**	-0.815**
Txn	0.153**	-0.462**	-0.893**
Txx	0.696**	-0.079**	-0.780**
Tn90	0.504**	0.065**	-0.184**
Tx90	0.394**	0.053**	-0.176**

注:**代表 $p < 0.01$, 通过了 $\alpha = 0.01$ 的显著性水平检验。

可以看出,除了 Txn 的 Hurst 指数小于 0.5, 为 0.476, 其余 9 个极端气温指数的 Hurst 指数都大于

表 3 10 个极端气温指数的 Hurst 指数

极端气温指数	FD	Tnn	Tnx	Tn10	Tx10	SU	Txn	Txx	Tn90	Tx90
过去趋势	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+
Hurst 指数	0.601	0.562	0.553	0.594	0.600	0.553	0.476	0.561	0.551	0.559
未来趋势	-	+	+	-	-	+	-	+	+	+

注:“+”表示增加或升高趋势,“-”表示减少或降低趋势。

4 讨论与结论

4.1 讨论

本文研究结果表明近 50 年来四川盆地的 10 个极端气温指数都呈现出显著暖化趋势,在将此结论与已有袁文德^[20]、罗玉^[21]、孙晨^[22]、贾艳青^[27]等对西南地区 and 四川省极端气温的相关研究进行对比后发现,本文得到的关于极端气温事件在近 50 a 的时空整体变化趋势与他们研究内容中涉及到的四川盆地结论较一致,即,冷系列极端气温指数整体上呈现暖化趋势,暖系列极端气温指数整体上呈现上升趋势,气候变暖趋势明显,然而由于研究区所选范围的不同,所选时间研究尺度和极端气温指数的不同,在时空变化的范围幅度值上有所差异,同时对四川盆地来说,极端低温的增温幅度是小于极端高温的增幅,这个结论与已有对西南地区极端气温的研究刚好相反,这和两者的研究区域选取和地形差异有很大关系。同时本文还结合 M-K 和滑动 T 检验两种方法对突变特征和未来趋势进行了研究,相比其他类似分析更加全面具体和细致。然而,在对引起极端气温事件的原因进行分析时,本文仅对极端气温指数和地理因子的相关性进行讨论还不够全面,由于影响极端气温事件的原因众多而且复杂,未来还可进一步从自然和人为两大因素中挑选主要因子进行更全面的分析,在对

0.5。而当 $Hurst < 0.5$, 则时间序列表现出反持久性的或逆状态持续性的,很有可能是记忆的转弱和反转的开始,即未来的变化趋势会呈现出与过去相反的趋势变化,且 Hurst 指数越接近于 0, 反持续性越强,因此 Txn 的结果表明在未来时期,年内日最高气温的最小值将呈现弱的减少趋势;而当 $Hurst > 0.5$, 反映了序列中隐藏的长期趋势,即长期记忆强,具有正效应,继续保持现有趋势的可能性强,且越接近于 1, 持续性越强,因此其余 9 个指数的结果表明在未来时期,霜日日数、冷夜日数、冷昼日数 3 个极端冷指数将继续减少,年内日最低气温的最小值、年内日最低气温的最大值、夏日日数、最大日最高气温、暖夜日数、暖昼日数将继续增加。总体来说,未来四川盆地的冷事件减少,暖事件增加,极端气温事件将继续呈现增加趋势。

未来趋势的预测上,也可以结合 CMIP6 的未来模式预估数据,通过统计和动力降尺度方法,对未来不同情景下的极端温度事件进行预估,这些都将是后续可进一步深入开展的工作。

4.2 结论

(1) 近 50 年内,四川盆地的极端气温指数都呈现暖化趋势,是全球变暖的正响应区。5 个极端暖指数 SU, Txn, Txx, Tn90, Tx90 与 5 个极端冷指数 FD, Tnn, Tnx, Tn10, Tx10 相互印证,均呈现暖化的趋势;不同类型指数在变化幅度上表现出较强的差异,暖指数中的 SU 和 Tx90 日数变动幅度大于其他极端气温指数。

(2) 5 个极端冷指数表现为盆地的北部和西部高于南部和中西部地区,其中四川的温江和都江堰地区普遍较低,5 个极端暖指数表现为盆地的中东部高于西部和北部地区,其中重庆市的万州和沙坪坝地区普遍较高。

(3) 在 1970—2019 年只有 1 个极端气温指数 Tx10 存在突变年(2012 年),其余 9 个极端气温指数都无明显突变年,即在近 50 年里四川盆地的极端气温并无明显突变,但于 20 世纪初期有平稳上升的趋势。

(4) 四川盆地内极端气温指数的变化主要与经度呈正相关,自西向东随经度的增加而增大;主要与纬度呈负相关,随纬度从南向北递减;与海拔高度呈

负相关,随海拔高度的升高而降低,即经度越大,纬度越低,海拔高度越低,极端气温指数值变化越大,体现为盆地的东南部地区极端气温事件变化最大。

(5) Hurst 指数分析表明,在未来时期, T_{xn} 将呈现弱的减少趋势; FD , T_{n10} , T_{x10} 这 3 个极端冷指数将继续减少, T_{nn} , T_{nx} , SU , T_{xx} , T_{n90} 和 T_{x90} 将继续增加。总体来说,未来四川盆地的冷事件减少,暖事件增加,极端气温事件将继续呈现增加趋势。

参考文献:

- [1] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2006, 111(5): D05109.
- [2] 丁之勇,葛拥晓,吉力力·阿不都外力,等.1957—2012 年新疆艾比湖流域极端气温与降水变化趋势[J]. *中国科学院大学学报*, 2018, 35(2): 160-171.
- [3] 赵安周,刘宪锋,朱秀芳,等.1965—2013 年黄土高原地区极端气温趋势变化及空间差异[J]. *地理研究*, 2016, 35(4): 639-652.
- [4] Karl T R, Kukla G, Razuvayev V N, et al. Global warming: evidence for asymmetric diurnal temperature change [J]. *Geophysical Research Letters*, 1991, 18(12): 2253-2256.
- [5] 崔凤琪,唐海萍,张钦,等.1960—2017 年呼伦贝尔草原极端气候事件时空变化[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(6): 1382-1391.
- [6] Diffenbaugh N S, Singh D, Mankin J S, et al. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2017, 114(19): 4881-4886.
- [7] Grotjahn R. Identifying extreme hottest days from large scale upper air data: a pilot scheme to find California central valley summertime maximum surface temperatures[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(3): 587-604.
- [8] Sanchez E, Gallardo C, Gaertner M A, et al. Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach[J]. *Global & Planetary Change*, 2004, 44(1): 163-180.
- [9] Choi G Y, Collins D, Ren G Y, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955—2007[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29(13): 1906-1925.
- [10] Jiang R G, Xie J C, Zhao Y, et al. Spatiotemporal variability of extreme precipitation in Shaanxi province under climate change[J]. *Theoretical & Applied Climatology*, 2017, 130(3): 831-845.
- [11] Gruza G, Rankova E, Razuvaev V, et al. Indicators of climate change for the Russian Federation[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 219-242.
- [12] Oscar P D, David O G. Analysis of anomalies and trends of climate change indices in Zacatecas, Mexico [J]. *Climate*, 2020, 8(4): 55.
- [13] Diedhiou A, Bichet A, Wartenburger R, et al. Changes in climate extremes over west and central Africa at 1.5° C and 2° C global warming [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(6): 065020.
- [14] Estiningtyas W, Syahbuddin H, Pramudia A, et al. Analysis of key locations as indicators for extreme climate impacts in supporting climate change adaptation in Indonesia [C] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021, 724(1): 012042.
- [15] 王雅芳,李艳,马百胜,等.1973—2011 年中国地区极端温度指数特征分析[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2020, 56(6): 774-784.
- [16] 孔锋.1961—2018 年中国极端冷暖事件变化及其空间差异特征[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(9): 34-44.
- [17] 杨萍,刘伟东,王启光,等.近 40 年我国极端温度变化趋势和季节特征[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(1): 29-36.
- [18] 吴吉东,傅宇,张洁,等.1949—2013 年中国气象灾害灾情变化趋势分析[J]. *自然资源学报*, 2014, 29(9): 1520-1530.
- [19] 高佳佳,杜军,次仁央宗,等.拉萨市极端气候变异特征及环流机制分析[J]. *安徽农业科学*, 2017, 45(17): 166-169.
- [20] 袁文德,郑江坤.1962—2012 年西南地区极端温度事件时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(7): 1246-1254.
- [21] 罗玉,范广洲,周定文,等.近 41 年西南地区极端温度变化趋势[J]. *西南大学学报:自然科学版*, 2016, 38(5): 161-167.
- [22] 孙晨,程志刚,毛晓亮,等.近 44 a 四川地区极端气候变化趋势及特征分析[J]. *兰州大学学报:自然科学版*, 2017, 53(1): 119-126.
- [23] 刘劲龙.四川盆地极端气温和降水研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [24] 于灏,周筠珺,李倩,等.基于 CMIP5 模式对四川盆地湿季降水与极端降水的研究[J]. *高原气象*, 2020, 39(1): 68-79.
- [25] 丁之勇,鲁瑞洁,刘畅,等.环青海湖地区气候变化特征及其季风环流因素[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(3): 281-292.
- [26] 张国存,查良松.南京近 50 年来气候变化及未来趋势分析[J]. *安徽师范大学学报:自然科学版*, 2008, 31(6): 580-584.
- [27] 贾艳青,张勃,马彬,等.1960—2015 年中国西南地区持续性干旱事件时空演变特征[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(5): 171-176.